

基于晶闸管 STATCOM 的无功补偿控制

邓家泽, 王奔, 黄崇鑫, 吴章辉

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Reactive Power Compensation Control Based on Thyristor Based STATCOM

DENG Jia-ze, WANG Ben, HUANG Chong-xin, WU Zhang-hui

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The thyristor based static synchronous compensator (STATCOM) can absorb continuously adjustable reactive power and is not affected by power system voltage. The authors analyze the mathematical model of thyristor based STATCOM at first; then a pseudo-linear system is constructed by inverse system method and combining with the theory of sliding mode variable structure control the direct reactive power compensation to power load by thyristor based STATCOM is implemented; finally, the computer simulation of the developed control system is performed. Simulation results show that the developed control method possesses better steady-state behavior and dynamic performance and strong adaptive capacity to reactive power variation of load.

KEY WORDS: thyristor; static synchronous compensator (STATCOM); inverse system; sliding mode variable structure; reactive power compensation

摘要: 晶闸管 STATCOM(static synchronous compensator)可吸收连续可调的无功,且不受电网电压影响。文中首先分析其数学模型;然后采用逆系统方法构造出伪线性系统,并结合滑模变结构控制理论,实现晶闸管 STATCOM 对负荷的直接无功功率补偿;最后对该控制系统进行计算机仿真。结果表明,文中采用的控制方法具有较好的动态性能和稳态性能,对负载无功变化的适应能力强。

关键词: 晶闸管; 静止同步补偿器(STATCOM); 逆系统; 滑模变结构; 无功补偿

0 引言

无功电源是保证电力系统电能质量、降低网络损耗及安全运行所不可缺少的部分。近年来,由于负荷容量快速增加,对电网无功功率的需求也日益增加,致使无功补偿装置在电力系统中的应用越来越广泛。其中,静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)受到了最广泛的关注。与 SVC 相比,STATCOM 具有响应速

度快、精度高、运行可靠、谐波电流少、损耗低以及安装面积小等优点^[1-5]。

STATCOM 装置多采用可关断器件,如门极可关断晶体管(gate turn-off thyristor, GTO)、集成门极换相晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)及绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)等。如果由普通晶闸管代替可关断器件,STATCOM 装置就可以实现其本身响应速度快、占地面积小和普通晶闸管价格便宜、容量大等优点的结合,并能在实际系统中得到推广应用^[6-7]。

逆系统方法作为非线性系统反馈线性化控制的一种方法,在近十几年中得到了迅速发展,并已成功应用于一些系统的控制^[8-11]。本文通过分析晶闸管 STATCOM 的工作原理,采用逆系统方法^[12-13]构造出伪线性系统,并结合滑模变结构控制理论^[14],实现晶闸管 STATCOM 快速、稳定的无功功率补偿。

1 晶闸管 STATCOM 的工作原理

首先分析基于 GTO 的 STATCOM 工作原理,可以通过分析图 1 中的 STATCOM 换流次序得出。图中逆变桥由 GTO 和二极管构成,直流侧以电容作为电压支撑,交流侧经等效阻抗 R_s 和 L 接入系统。图中: u_a 、 u_b 、 u_c 为系统侧三相对称电源电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为系统侧三相线电流; U_{dc} 为逆变桥直流侧电压。

采用 Matlab/Simulink 仿真图 1 所示系统,要求 GTO 的导通和关断各为 180° ,并且取触发角 δ 为 $+2^\circ$ 。以 A 相为例,可绘制出系统相电压 u_a 、相电流基波 i_{a1} 、实际相电流 i_a 及 G_1 管触发信号 g_1 的相位关系,如图 2 所示。

由图 2 可见,相电流基波 i_{a1} 和相电压 u_a 的相角相差 $(\pi/2 + \delta)$,近似为 90° 。而采用晶闸管 STATCOM,在触发角 δ 为 $+2^\circ$ 时,可得出相同的相位关系。即系

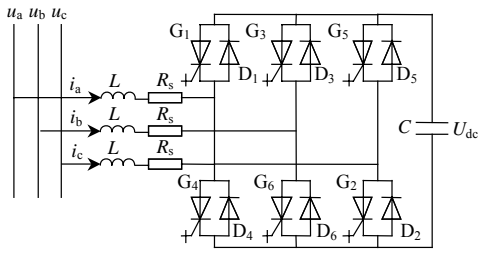


图1 STATCOM 主电路
Fig. 1 Main circuit of STATCOM

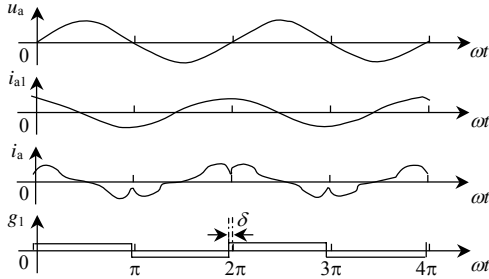


图2 A相电压、电流、触发信号相位关系
Fig. 2 Relative phase of A phase voltage, current and fire signal

统超前运行($\delta > 0$)时, 关断信号不起任何作用, 只有开通信号起作用, 此时, 可关断器件的行为与晶闸管没有任何区别, 完全可用晶闸管代替可关断器件。具体的换流分析可参见文献[6-7]。

2 晶闸管 STATCOM 的数学模型

晶闸管 STATCOM 装置主电路拓扑结构与图 1 相同, 只是将 GTO 换为晶闸管。晶闸管 STATCOM 在 abc 坐标下的数学模型^[6]为

$$\begin{cases} Ldi_a(t)/dt = u_a(t) - R_s i_a(t) - u_{ia}(t) \\ Ldi_b(t)/dt = u_b(t) - R_s i_b(t) - u_{ib}(t) \\ Ldi_c(t)/dt = u_c(t) - R_s i_c(t) - u_{ic}(t) \\ CU_{dc}dU_{dc}(t)/dt = u_{ia}(t)i_a(t) + u_{ib}(t)i_b(t) + u_{ic}(t)i_c(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} u_{ia}(t) = KU_{dc}(t)\sin(\omega t + \delta) \\ u_{ib}(t) = KU_{dc}(t)\sin(\omega t - 2\pi/3 + \delta) \\ u_{ic}(t) = KU_{dc}(t)\sin(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \end{cases}$$

式中: K 为逆变桥输出相电压基波幅值与直流电压的比值; δ 为触发角, 也是逆变桥输出相电压基波与系统电压的相位差。对式(1)中的前 3 项(电流暂态数学模型)作 dq 变换, 可得到晶闸管 STATCOM 在 dq 坐标下的数学模型^[15-16]:

$$\begin{cases} Ldi_d/dt = -R_s i_d + \omega Li_q + K \cos \delta U_{dc} + u_d \\ Ldi_q/dt = -\omega Li_d - R_s i_q - K \sin \delta U_{dc} + u_q \end{cases} \quad (2)$$

在 dq 坐标下, 令系统侧电压相量为 $\vec{u}_s = u_d + ju_q$, 电流相量为 $\vec{i}_s = i_d + ji_q$ 。可得到逆变桥交流侧

的有功功率、无功功率分别为

$$p = u_d i_d, \quad q = -u_d i_q \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得

$$\begin{cases} dp/dt = -R_s p/L - \omega q - Ku_d U_{dc} \cos \delta / L + u_d^2 / L \\ dq/dt = \omega p - R_s q/L + Ku_d U_{dc} \sin \delta / L - u_d u_q / L \end{cases} \quad (4)$$

3 基于逆系统直接无功补偿的滑模变结构控制

本文采用逆系统方法理论, 求出晶闸管 STATCOM 的逆系统, 并利用状态反馈方法构建伪线性系统, 然后利用滑模变结构控制理论的方法设计系统的控制策略。

晶闸管 STATCOM 的直接功率控制^[17-18]目标是: 功率因数接近 1, 且直流侧电压稳定。而晶闸管 STATCOM 与可关断器件 STATCOM 的控制方法不同, 其区别在于: 晶闸管 STATCOM 采用相控方式, 只能输入一个控制量 δ , 而可关断器件的 STATCOM 采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM), 有多个输入。

由图 2 可得

$$\begin{cases} i_{a1} = I_s \sin(\omega t + \pi/2 + \delta) \\ i_{b1} = I_s \sin(\omega t - \pi/6 + \delta) \\ i_{c1} = I_s \sin(\omega t + 7\pi/6 + \delta) \end{cases} \quad (5)$$

式中 I_s 为相电流基波幅值。对式(5)进行 dq 变换可得

$$\begin{cases} i_d = I_s \cos(\pi/2 + \delta) \\ i_q = I_s \sin(\pi/2 + \delta) \end{cases} \quad (6)$$

由于触发角 δ 值很小, 因此可得出 $i_q \gg i_d$, 即晶闸管 STATCOM 吸收的无功远大于其有功损耗, 所以在设计直接无功补偿时仅考虑无功的控制。同时, 由于晶闸管 STATCOM 只能吸收无功功率, 若要用于实际电力系统无功补偿, 还应与电容器配合使用, 以实现收、发无功的作用。

根据逆系统方法, 对式(4)第 2 项所示系统选取状态变量为 $[x_1, x_2, x_3]^T = [p, q, KU_{dc}]^T$, 输出变量为 $y = q$, 输入变量为 $u = \delta$ 。可得到如下形式:

$$\dot{y} = \omega x_1 - R_s x_2 / L + u_d x_3 \sin u / L - u_d u_q / L \quad (7)$$

对式(7)求解 u , 可得

$$u = \arcsin(\dot{y} - \omega x_1 + R_s x_2 / L + u_d u_q / L) / (u_d x_3) \quad (8)$$

并令式(8)中的 $\dot{y} = v$, 可得逆系统为

$$u = \arcsin(v - \omega x_1 + R_s x_2 / L + u_d u_q / L) / (u_d x_3) \quad (9)$$

对于 $\dot{y} = v$ 所示的线性系统取如下滑模面:

$$S = q^* - q \quad (10)$$

式中 q^* 为负载吸收的无功。等式两边求导可得

$$\dot{S} = -\dot{q} \quad (11)$$

在变结构控制中，希望状态变量按一定的指数规律到达切换面，取变结构控制的指数趋近律如下：

$$\dot{S} = -kS - \varepsilon \operatorname{sgn}(S) \quad (12)$$

式中 k 、 ε 为大于零的常数。由式 $\dot{y} = v$ 及式(11)、(12)可得

$$v = k(q^* - q) + \varepsilon \operatorname{sgn}(q^* - q) \quad (13)$$

利用状态反馈，可将式(13)与系统的伪线性系统连接在一起，构成晶闸管 STATCOM 的闭环控制系统，实现对负荷的直接无功补偿。由此可得到控制系统框图，如图 3 所示。

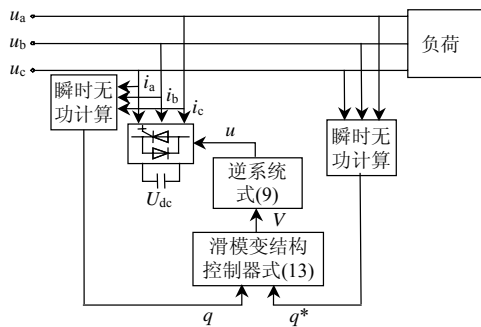


图 3 基于逆系统方法的无功补偿系统结构

Fig. 3 Block diagram of reactive power compensation system based on inverse system method

4 仿真验证

为了验证本文所述方法的有效性，用 Matlab/Simulink 对采用逆系统方法控制的晶闸管 STATCOM 进行仿真。电网电压 $U_m = 311 \text{ V}$ ，频率 $f = 50 \text{ Hz}$ ；交流侧电感 $L = 18 \text{ mH}$ ，电阻 $R_s = 0.8 \Omega$ ；直流侧电容 $C = 0.0022 \text{ F}$ 。对于电压型电路来说，输出电压为矩形波，表示含有较多的谐波分量，该仿真采用三相二重化接线以消除 5 次、7 次等主要谐波，接线如图 4 所示。图中 T_1 、 T_2 为变压器。

图 5 为系统启动时的仿真曲线。由系统输出的电流和电压波形及其直流侧电压 U_{dc} 波形可知，系统在启动后 0.28s 达到稳定，电流 i_a 接近正弦波，谐波含量很少，直流侧电压 U_{dc} 稳定后在 $\pm 4 \text{ V}$ 上下波动。

图 6 为补偿负载无功负荷时直流侧电压 U_{dc} 的仿真波形，0.8 s 后负载无功量由 4 kvar 阶跃至 2.5 kvar。由图 6 可知，补偿的无功量改变时其电压的稳定值也随之改变，与 IGBT 的 STATCOM 直流侧电压保持不变^[19]不同，其主要原因是：晶闸管 STATCOM 通过触发角的控制来改变其交流侧的电压幅值，从而控制电流的无功分量 i_q ；而可关断器件 STATCOM 直流侧的电压幅值不变，它是通过改变脉冲的占空比来获得所需要的电压输出，以此来控制电流的无功分量 i_q 。

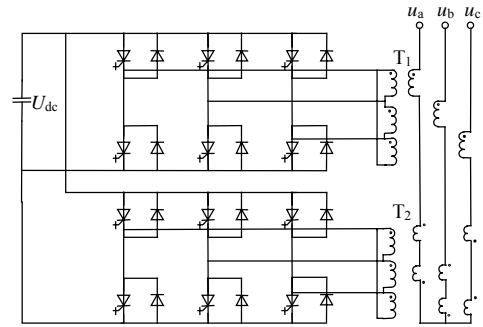
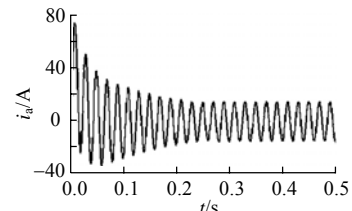
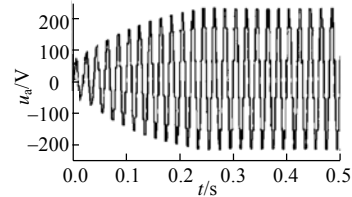


图 4 三相二重化的晶闸管 STATCOM 结构

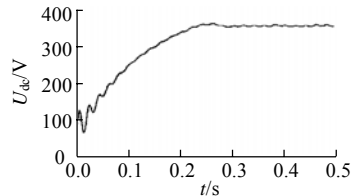
Fig. 4 Block diagram of three-phase dual thyristor based STATCOM



(a) 交流侧 A 相电流波形



(b) 交流侧 A 相电压波形



(c) 直流侧电压波形

图 5 晶闸管 STATCOM 的仿真波形

Fig. 5 Simulation curves of thyristor based STATCOM

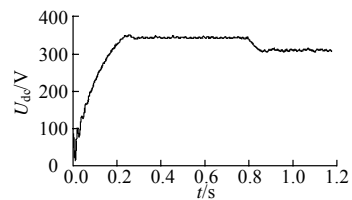


图 6 直流侧电压波形

Fig. 6 Curve of DC-side voltage

图 7 为晶闸管 STATCOM 与可关断器件 STATCOM 补偿无功的效果比较。从系统启动上看，晶闸管 STATCOM 达到稳定稍慢，但在 0.8 s 负载无功改变时，都能在 0.05 s 内使系统的功率因数回到 1，可见其响应速度很快，仅启动较慢。如果能在系统启动前对直流侧电容充电，就可以加快其稳定速度，并且设备一旦投入运行也不会频繁关断。

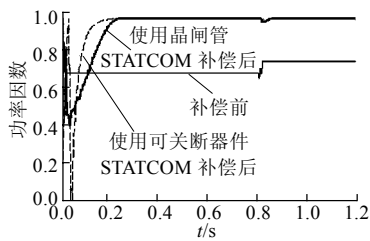


图7 无功补偿效果比较

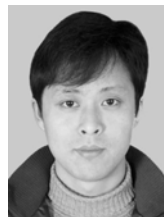
Fig. 7 Comparison of reactive power compensation

5 结论

本文采用逆系统理论,分析了晶闸管 STATCOM 的数学模型,并研究了其非线性控制方法。仿真结果表明:这种方法可以快速、有效地实现晶闸管 STATCOM 对负载无功的补偿。同时,晶闸管 STATCOM 直流侧是一个小电容器,用电压多重化消除谐波后不需要滤波器,因此与 SVC 相比,在成本和装置体积上均有一定优势,而且晶闸管及其触发、保护环节成本大大低于可关断器件(IGBT 等),因此晶闸管 STATCOM 完全可以在实际系统中得到有效的推广和应用。

参考文献

- 伏祥运,王建曩,张小聪,等.三相电压源型逆变器级联的静止同步补偿器[J].电网技术,2006,30(22):72-76.
Fu Xiangyun, Wang Jianze, Zhang Xiacong, et al. A static synchronous compensator based on three-phase cascaded voltage source inverter[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 72-76(in Chinese).
- 朱永强,刘文华,邱东刚,等.基于单相 STATCOM 的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究[J].电网技术,2003,27(8):42-45,71.
Zhu Yongqiang, Liu Wenhua, Qiu Donggang, et al. Simulation of balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 42-45,71(in Chinese).
- 郭红霞,吴捷,刘永强,等.基于强化学习算法的静止同步补偿电压控制器[J].电网技术,2004,28(19):9-13.
Guo Hongxia, Wu Jie, Liu Yongqiang, et al. Application of reinforcement learning to STATCOM controller[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 9-13(in Chinese).
- 伏祥运,王建曩,曾繁鹏,等.一种改进的混合静止同步补偿器[J].电网技术,2006,30(15):76-80.
Fu Xiangyun, Wang Jianze, Zeng Fanpeng, et al. An improved hybrid static synchronous compensator[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 76-80(in Chinese).
- 武小梅,严干贵.基于级联式电压源逆变器的静止同步补偿器直流电压控制策略[J].电网技术,2006,30(18):49-53.
Wu Xiaomei, Yan Gangui. Control strategy of DC capacitor voltage of static synchronous compensator based on cascaded multilevel voltage source inverter[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 49-53(in Chinese).
- 徐炜,陈建业,宋珊.基于晶闸管的静止同步补偿器的建模与实现[J].中国电力,2007,40(4):11-15.
Xu Wei, Chen Jianye, Song Shan. Modelling and implementation of a thyristor-based STATCOM[J]. Electric Power, 2007, 40(4): 11-15(in Chinese).
- 宋珊,陈建业.基于晶闸管的 STATCOM 原理和实现[J].电力系统自动化,2006,30(18):49-53.
Song Shan, Chen Jianye. Theory and prototype verification of thyristor based STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 49-53(in Chinese).
- 葛友,李春文,孙政顺.逆系统方法在电力系统综合控制中的应用[J].中国电机工程学报,2001,21(4):1-4.
Ge You, Li Chunwen, Sun Zhengshun. Application of inverse system method for power system integrated control[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 1-4(in Chinese).
- 赵绍刚,李娟秀,漆随平.基于逆系统方法的三相 PWM 整流器控制[J].电力自动化设备,2006,26(11):46-48.
Zhao Shaogang, Li Juanxiu, Qi Suiping. Inverse control of three-phase PWM rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(11): 46-48(in Chinese).
- 魏文辉,刘文华,宋强,等.基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J].中国电机工程学报,2005,25(3):23-28.
Wei Wenhui, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28(in Chinese).
- 姜素霞,安小宇,李春文,等.基于逆系统方法的单相并联 APF 控制策略研究[J].继电器,2008,36(6):51-58.
Jiang Suxia, An Xiaoyu, Li Chunwen, et al. Control strategy study of single-phase parallel active power filter based on inverse system method[J]. Relay, 2008, 36(6): 51-58(in Chinese).
- 戴先中.多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M].北京:科学出版社,2005:17-87.
- 李春文,冯元琨.多变量非线性控制的逆系统方法[M].北京:清华大学出版社,1991:56-121.
- 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社,1996:152-176.
- Komurcugil H, Kukrer O. Lyapunov-based control for three phase PWM AC/DC voltage-source converters[J]. IEEE Trans on Power Electron, 1998, 13(5): 801-813.
- Lee T S, Tzeng K S. Input-output linearizing control with load estimator for three-phase AC/DC voltage-source converters[C]. Proceedings of 23rd IEEE Annual AC/DC Power Electronics Specialists Conference, Cairns, Australia, 2002: 791-795.
- Noguchi T, Tomiki H, Kondo S, et al. Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1998, 34(3): 473-479.
- 王久和,李华德,王立明.电压型 PWM 整流器直接功率控制系统[J].中国电机工程学报,2006,26(18):54-60.
Wang Jiuhe, Li Huade, Wang Liming. Direct power control system of three phase boost type PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 54-60(in Chinese).
- 茅靖峰,孙玉坤,吴爱华,等.静止同步补偿器装置建模、控制与仿真[J].系统仿真学报,2007,19(10):2332-2336.



邓家泽

收稿日期:2008-06-03.

作者简介:

邓家泽(1981—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统无功和电压稳定,E-mail: djz_111@163.com;

王奔(1960—),男,博士后,教授,研究方向为非线性变结构控制;

黄崇鑫(1983—),男,硕士研究生,研究方向为柔性交流输电装置的运行和控制;

吴章辉(1982—),男,硕士研究生,研究方向为

电机系统控制。

(责任编辑 沈杰)